Nagy Attila

A KELEBIAI TÓ ÉS A TALAJVÍZ KÖLCSÖNHATÁSA

VMTDK dolgozat

Szabadka, 2018.

Tartalomjegyzék

Ábrák jegyzéke **II**

Táblázatok jegyzéke **III**

Használt jelölések **IV**

1. Bevezetés **1**

2. A Kelebiai tó **3**
2.1. A tó történelme 3
2.2. A terület topográfiája 8
2.3. A terület pedológiai tulajdonságai 8
2.4. A terület hidrogeológiai tulajdonságai 9
2.5. A terület klimatikus és meteorológiai tulajdonságai 11

3. A tó hidrológiai folyamatainak modellje **12**
3.1. A modell koncepciója 12
3.2. A matematikai meg a numerikus modell 12
3.2.1. Számítási egyenletek 12
3.2.2. Kezdeti feltételek 15
3.2.3. Peremfeltételek 15
3.2.4. Az elemzett időtartam 21
3.2.5. Az eredmények bemutatása és elemzése 21

4. Záradék **31**

Felhasznált irodalom **32**

Ábrák jegyzéke

1. ábra A Kelebiai tó műholdképe . . . 1
2. ábra A Kelebiai tó jelenlegi állapota . . . 2
3. ábra A Mélykúti úton folyik a víz Szabadka felé . . . 3
4. ábra Szabadka környéki belvizes területek 1942-ben . . . 4
5. ábra Az 1951-1985 között megfigyelt kutak helye . . . 4
6. ábra A terület talajvízszintje 1969-ben . . . 5
7. ábra A Kelebiai tó a déli áteresznél 1987-ben . . . 6
8. ábra 1988-ban kiszáradt a Kelebiai tó . . . 6
9. ábra A Kelebiai tó a déli áteresznél 2018-ban . . . 7
10. ábra A Kelebiai tó a déli áteresznél 2018-ban . . . 7
11. ábra Részlet Vajdaság topográfiai térképéből . . . 8
12. ábra Részlet Vajdaság talajtani térképéből . . . 8
13. ábra Részlet Vajdaság geomorfológiai térképéből . . . 9
14. ábra Részlet Vajdaság geológiai térképéből . . . 10
15. ábra Részlet Vajdaság hidrogeológiai térképéből . . . 10
16. ábra Az 1969-ben készített furatok . . . 11
17. ábra Külső és belső határvonal . . . 16
18. ábra A megfigyelt kutak . . . 17
19. ábra Az év folyamán mért talajvízszintek és tószintek . . . 17
20. ábra A 21.-től 30. ábrára vonatkozó szintjelölés . . . 21
21. ábra Talajvízszintek 2017.07.29-én . . . 22
22. ábra Talajvízszintek 2017.09.09-én . . . 22
23. ábra Talajvízszintek 2017.10.21-én . . . 23
24. ábra Talajvízszintek 2017.12.02-án . . . 23
25. ábra Talajvízszintek 2018.01.13-án . . . 24
26. ábra Talajvízszintek 2018.02.24-én . . . 24
27. ábra Talajvízszintek 2018.04.07-én . . . 25
28. ábra Talajvízszintek 2018.05.19-én . . . 25
29. ábra Talajvízszintek 2018.06.30-án . . . 26
30. ábra Talajvízszintek 2018.07.28-án . . . 26
31. ábra A tó vízmérlegének eredő vízhozama . . . 28
32. ábra Az északi szektor kumulatív víztérfogat változása az idő folyamán . . 29
33. ábra A déli szektor kumulatív víztérfogat változása az idő folyamán . . . 29

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat Az év folyamán mért talajvízszintek és tószintek 18
2. táblázat Átlaghőmérséklet és kipárolgás Szabadka környékén 20
3. táblázat Csapadék és kipárolgás a Kelebiai tó környékén 20
4. táblázat Északi szektor vízhozama 27
5. táblázat Déli szektor vízhozama 27

Használt jelölések

A_v - a tó névleges felülete

d - napos órák száma

e_p - a talaj hidraulikai porozitása

ET - evapotranszpiráció

ET' - potenciális evapotranszpiráció

H - referencia síkhoz viszonyított talajvízszint

i - havi hőmérséklet tényező

I - éves hőmérséklet tényező

K - szivárgási tényező

k_r - korrekciós tényező

L - a talajréteg vastagsága

P - csapadékmagasság

q_i - adott kontroll térfogat valamely oldalán keresztül megvalósuló vízhozam

Q_w - a csapadék és a kipárolgás következtében jelentkező vízhozam

t - idő

T_a - havi átlaghőmérséklet

v - áramlási sebesség

W - csapadékintenzitás - evapotranszpiráció

x - távolság

Δt - idő növekmény

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ - térfogatváltozás egységnyi idő alatt

Δx - távolság növekmény

Π - piezószint

1. Bevezetés

A Szabadkától északnyugatra fekvő Kelebiai tó a környék legrégibb tava. A XX. század közepéig jellemző volt rá a magas vízszint illetve az áradások, ezért többször tervezték vízszintjének szabályzását árapasztó csatorna megépítésével. E célból többször végeztek munkálatokat is.

A Szabadkától északabbra fekvő területeken az utóbbi évtizedekben jelentős talajvízszint csökkenés ment végbe. Többek között erre utalnak a növényvilágban végbemenő változások és a kiszáradt kutak. A talajvízszint csökkenés komoly problémát okoz úgy a természetes élővilág fenntartásában, mint a földművelésben. A legszembetűnőbb változás a Kelebiai tónál figyelhető meg: az utóbbi évtizedekben vízállása tartósan alacsony.

Ezekről a változásokról még nem rendelkezünk mért adatokkal. A Kelebiai tó körül, a Szabadkai Homokpuszta nyugati részén az 1980-as évek óta nem történt sem talajvíz, sem tószint mérés. A dolgozat keretein belül a Kelebiai tó jelenlegi állapotáról próbálunk elsődleges adatokat szerezni, és ha lehetséges összehasonlítani az elérhető múltbéli adatokkal.

A Kelebiai tó 25 m-rel a Palicsi tó szintje fölött helyezkedik el. Alakja egy torz

1. ábra: *A Kelebiai tó műholdképe*

négyesre, S betűre hasonlít (1. ábra). A tó körül szántóföldek, legelők, gyümölcsösök találhatóak. Területe $0,6\ km^2$, a XIX. században állandóbb jellegű volt a vízszintje mint a Ludasi tónak. Mivel 1988 óta tartósan alacsony a vízszintje, ezért gyakran Kelebiai rét néven emlegetik. Átlagmélysége $0,5\ m$ [3].

2. ábra: *A Kelebiai tó jelenlegi állapota*

A tavon 3 áteresz található, a középső áteresz két szektorra osztja a tavat. A tó jelenleg teljesen el van hanyagolva, átereszei el vannak tömődve, majdnem teljes felületét beborította a nád, ahogy a képen is látható (2. ábra). A fénykép a déli szektort mutatja, a középső áteresznél készült.

2017.07.29-étől 2018.07.28-áig 3 kútban és két helyen a tóban vízszint mérések történtek két hetes időközönkén. A mérési adatok egy numerikus modell elkészítéséhez szükségesek. A három kútban és a tó szektoraiban (északi és déli szektor) mért vízszintek segítségével meghatároztuk a modellezett áramlási tér külső határfeltételeit. Beszereztük az elemzett időtartamra a területre vonatkozó hőmérsékleti adatokat, az adatok alapján a Thornthwaite módszer alkalmazásával meghatároztuk a talajból való vízelpárolgást, valamint beszereztük a területre hullott csapadék mennyiséget. Az adatokra támaszkodva sikerült létrehozni a tó környéki terület talajvíz ingadozásának numerikus modelljét, annak reményében hogy segíti a tó vízmérlegének jobb megismerését.

2. A Kelebiai tó

2.1. A tó történelme

A Magyar Királyság I. katonai felméréséhez tartozó Országleírásban, 1783-ban a következőt jegyezték fel [1]: a Kelebiai tó sohasem szárad ki, nem átjárható csak néhány helyen a közepe felé. Tavasszal általában kiárad, legnagyobb mélysége 1,9 m.

1848 márciusában csatornát építettek a Kelebiai tó és a Nagy-rét közé, azzal a céllal, hogy a tavat teljes mélységében (ami 1,9 m) lecsapolják. A csatorna a Pesti út mellett húzódott, 2,65 km hosszú volt.

1872-ben a tó árvize elöntötte a Mélykúti út és a Bajai szőlők egy részét. Lecsapolására az 1848-ban elkészült csatornát újították fel és hosszabították meg.

1881. március 1-én a megáradt Kelebiai tó elöntötte a Mélykúti út egy részét. Verner János, a Mélykúti út és a Bajai szőlők mellett 2,8 m mély, 2,84 km hosszú csatornát tervezett. 1882-től a Mélykúti út melletti csatornát használták a tó lecsapolására. Ez évben 63 cm vízoszlopnak megfelelő víz lecsapolását ajánlotta Hönsch Dezső.

1904-ben kiszáradt a tó. 1920-ban felújították a Mélykúti út melletti csatornát.

3. ábra: *A Mélykúti úton folyik a víz Szabadka felé [1]*

1941. februárjában kiöntött a tó. A Mélykúti úton Szabadka felé folyt a víz (3. ábra). 1942-ben a Kelebiai tó környékén az árvízsúlytotta terület 364 ha (4. ábra).

1951-től két ásott kútban (az 1-es és 14-es kútban) kezdték megfigyelni a vízszinteket (5. ábra). Időközben a 14-es kutat betemették és új kutat hoztak létre. Az új kút az előzőhöz közel volt, a 14m elnevezést kapta. 1956-tól újabb, a 13-as kútban kezdik mérni a vízszintet. A mérések 1985-ben abbamardnak, azóta nem történt újabb mérés.

4. ábra: *Szabadka környéki belvizes területek 1942-ben [1]*

5. ábra: *Az 1951-1985 között megfigyelt kutak helye (a kutakat 1, 13 és 14-es számokkal jelölt pontok jelzik) [1]*

1967 tavaszán a tó elárasztotta a Mélykúti út egy részét. 1969.04.11-én méréseket végeztek a tóban, ezen mérések segítségével, valamint a kutakban mért vízszintek alapján megrajzolták a terület talajvízszint állapotát (6. ábra). Az ábrán látható szintvonalak pontatlanok, nem követik a valóságot. Segítségével viszont megállapítható a tószint és az áramlás iránya. A tó vízszintje körülbelül 122,5 m tengerszint feletti magasságú. A talajvíz globálisan északnyugat délkelet irányban áramlik, illetve a tótól mind jobb, mind bal oldalon is magasabb a talajvízszint. Ezen mérésen kívül nincs több feljegyzés a tó vízszint ingadozásáról.

1970-ben tervet készítenek a Kelebiai tó árvizének lecsapolására. 1972-1976 között

6. ábra: *A terület talajvízszintje 1969-ben [1]*

megépül az új csatorna. 1979-1983 között kikotorták a Kelebiai tó medrét. 1987-ben elegendő víz volt a tóban a hasznosításra, öntözésre (7. ábra), míg 1988-ban majdnem teljesen kiszáradt (8. ábra). 1988 óta tartósan alacsony a tó vízszintje, az átlagmélység körülbelül 0,5 m [1]. Ez a hirtelen tószint és talajvíz csökkenés valószínűen geológiai változás, illetve a lecsapolás következtében történt, de további geológiai vizsgálat nélkül ezt nem lehet biztosan állítani.

2014-ben a tó helyreállítását tervezik. A tó környékét átalakították volna pihenési, sport és turisztikai kirándulóhellyé. Az I. szektorban 122,90 m tengerszint feletti magasságig, a II. szektorban 123,20 m tengerszint feletti magasságig emelnék a vízszintet. Ez körülbelül 2 m vízszint emelkedést jelentene [4].

Az utóbbi években nem történt számottevő változás a tóban. A tó jelenleg teljesen el van hanyagolva, átereszei el vannak tömődve, majdnem teljes felületét beborította a nád.

7. ábra: *A Kelebiai tó a déli átereszné 1987-ben [1]*

8. ábra: *1988-ban kiszáradt a Kelebiai tó [1]*

9. ábra: *A Kelebiai tó a déli áteresznél 2018-ban*

10. ábra: *A Kelebiai tó a déli áteresznél 2018-ban*

2.2. A terület topográfiája

11. ábra: *Részlet Vajdaság topográfiai térképéből*

A terület topográfiai térképéről megállapítható a terület globális és lokális esése (11. ábra). Globálisan északnyugat felöl, a szerb-magyar határ felöl délkelet, vagyis a Palicsi tó felé lejt a terület. Az esés $1,3$ %. Lokálisan viszont a tó környéke lejt a tó felé. A lokális esés körülbelül $0,2 \div 0,3$ % a topográfiai térkép alapján. Az alsó szektor keleti partján viszont egy töltés található, ez megakadályozza hogy a felszíni csapadékvíz a tóba follyon.

2.3. A terület pedológiai tulajdonságai

12. ábra: *Részlet Vajdaság talajtani térképéből*

A pedológia, másnéven talajtan, a talaj felszíni összetételével foglalkozik. A Kelebiai tó két különböző talaj határán helyezkedik el (12. ábra). A tótól nyugatra fekete humusz (csernozjom) valamint réti feketeföld keveréke található. Keletre sárga homok húzódik ritka mezei feketeföldd el keverve, mélyebb részein szikesedés jelei mutatkoznak. Az előbbi talaj magasabb agyagtartalommal rendelkezik, jellemzője a humuszanyagok felhalmozódása, illetve a kedvező morzsalékos szerkezet. Nagy a vízmegtartó képessége, lassan engedi át a vizet. Kiválóan alkalmas növénytermesztésre. Az utóbbi talaj rossz vízmegtartó, gyors vízáteresztő képsességgel rendelkezik. A terület felső rétegeinek pedológiai tulajdonságai kihatással vannak a felszínre kerülő csapadékvíz beszivárgására, párolgására.

2.4. A terület hidrogeológiai tulajdonságai

13. ábra: *Részlet Vajdaság geomorfológiai térképéből*

Vajdaság geomorfológiai térképéből megállapítható, hogy a Kelebiai tó két domborzati forma határvonalán található (13. ábra). A tótól keletre homoktakaró található alacsony dombokkal. Nyugatra sík lösszös terület húzódik, melyen alluviális folyamatok nyomai ismerhetőek fel. A talaj geológiai összetételét illetően, a tó szintén két talajtípus határán található (14. ábra). A térkép jelmagyarázata csak a tótól keletre húzódó talajfajtát jelölte meg, az eolikus homok. Az "eolikus" arra utal, hogy a talaj a szél hatására, lerakódás útján keletkezett.

Vajdaság hidrogeológiai térképéből megállapíthatjuk, hogy a Szabadkától északra és nyugatra fekvő területen aprószemű, eolikus homok és por található (15. ábra). Ez a réteg 30 m mélységig terjed, alatta egy vastagabb vízzáró réteg található. Vízáteresztő képessége $(1 \div 5) \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$. A Kelebiai tó is ezen a területen fekszik. A következő ami megfigyelhető Vajdaság hidrogeológiai térképén a talajvíz áramlási iránya. Szabadka, vagyis a Kelebiai tó környékén a talajvíz északnyugat-délkelet irányában szivárog.

14. ábra: *Részlet Vajdaság geológiai térképéből*

15. ábra: *Részlet Vajdaság hidrogeológiai térképéből*

Az előző adatokból kiderül, hogy a Kelebiai tótól keletre homok, nyugatra pedig lösszös homokos talaj található. A tó környékén 1969-ben 3 talajtani furatot készítettek (16. ábra). Ezen furatok közül kettő csak 5 m mélységig terjedt. A harmadik furat mélysége azonban 30 m, vagyis a mélysége megegyezik a hidrogeológiai térképen található felszíni rétegek mélységével. A numerikus modellben használt filtrációs tényező értékét a 2D furat alapján határoztuk meg. Mivel nem állt rendelkezésre több adat, ezért a területet homogén, izotróp közegként kezeltük. A filtrácóis tényezőt a következő, párhuzamos geológiai rétegekre alkalmazható képlettel számítottuk ki:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{4} L_i \cdot K_i}{L} \tag{2.1}$$

$$K = \frac{\begin{pmatrix} 5,5\ m \cdot 4,60 \cdot 10^{-6}\ \frac{m}{s} + (10\ m - 5,5\ m) \cdot 5,60 \cdot 10^{-6}\ \frac{m}{s} + \\ (13\ m - 10\ m) \cdot 1,56 \cdot 10^{-5}\ \frac{m}{s} + (30\ m - 13\ m) \cdot 2,64 \cdot 10^{-7}\ \frac{m}{s} \end{pmatrix}}{30\ m} = 3,39 \cdot 10^{-6}\ \frac{m}{s}$$

16. ábra: *Az 1969-ben készített furatok [1]*

2.5. A terület klimatikus és meteorológiai tulajdonságai

A Kelebiai tó a kontinentális éghajlati övben található. Az éghajlatra jellemző a meleg nyár és a hideg tél, nagy napi és éves hőmérséklet ingadozásokkal, erős szelekkel. Az éves átlagcsapadék 560 mm, a legcsapadékosabb időszak májustól júliusig terjed. A legszárazabb a január és a február. A legmelegebb időszak júniustól augusztusig, a leghidegebb időszak pedig decembertől februárig tart.

A környéken két meteorológiai állomás található: Palicson és Zomborban. 2017-ben Szabadkán az Építőmérnöki Karon létrehoztak egy meteorológiai állomást. Az Építőmérnöki Karon folyamatosan mérik a levegő hőmérsékletét, a légnyomást, a szélsebességet és a csapadékot. Ezen adatok segítségével meghatározhatóak a napi illetve a havi átlagok, minimumok és maximumok. A numerikus modellhez az Építőmérnöki Karon mért adatokat használtuk, mivel ez a meteorológiai állomás van legközelebb a vizsgált területhez. Mivel a meteorológiai államás nemrég lett beüzemelve, az adatok csak 2018.04.23-ától állnak rendelkezésre.

3. A tó hidrológiai folyamatainak modellje

A talajvíz áramlási modellje eszköz, melynek segítségével leírható a víz áramlása adott hidrogeológiai rendszerben. A szimuláció célja a piezószint meghatározása az áramlási tér bármely pontjába, ami lehetővé teszi az áramlási sebességek számítását. A modell, mely tartalmazná az összes tényezőt melyeknen hatása van az áramlásra, túl összetett lenne, sok munkát és ésszerűtlenül nagy számítógépi kapacitást igényelne. Ezért csak azok a tényezők kerülnek a modellbe, amelyek a legnagyobb hatást gyakorolják az áramlásra. Ezért minden modell csak egy adott helyzetben, adott körülmények között használható egy bizonyos pontossággal. Az áramlás főleg a kezdeti és a peremfeltételektől függ, amelyek lehetnek állandósultak vagy időben változóak.

Esetfüggően a következő modellek használhatóak (4. fejezet, [2]):

- Fizikai modell
- Analóg modell
- Áramkép grafikus szerkesztése
- Analitikus számítási modell
- Numerikus számítási modell

3.1. A modell koncepciója

A Kelebiai tavat egy kontrolltérfogatnak tekintjük. A tó térfogata folyamatosan változik az idő folyamán. Ez a változás a talajvíz tóba való be és kiáramlásától, a tó felületére eső csapadéktól és a tóból való elpárolgástól függ. Amennyiben több víz jut a tóba mint amennyi távozik, a tó térfogata növekszik. Ha viszont több víz távozik a tóból, akkor víztartaléka csökken. A modell feladata, hogy áttekintést adjon arról, mely időszakban töltődik és mikor ürül a tó. Ezenfelül az is lényeges melyik oldalon töltődik, melyik oldalon veszti a vizet és mekkorák a vízszintingadozások.

3.2. A matematikai meg a numerikus modell

Amikor a modell koncepciójában leírt folyamatokat felírjuk egyenletek segítségével, matematikai modell jön létre. A matematikai modell numerikus megoldásához az áramlási teret számítási hálóval kell befedni. Az elemzett esetben $10 \cdot 10$ m-es felosztást használtunk. A modell 181 egység hosszú és 251 egység széles. A számítási háló minden metszéspontjában érvényes az áramlás egyenletének diszkretizált alakja.

3.2.1. Számítási egyenletek

Az áramlás egyenlete

Az áramlást leíró differenciálegyenlet az úgynevezett Bussinesq egyenlet (lásd a 7.11-es egyenletet, [2]):

$$e_p \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial \left(K_1 \cdot H \cdot \frac{\partial H}{\partial x_1} \right)}{\partial x_1} + \frac{\partial \left(K_2 \cdot H \cdot \frac{\partial H}{\partial x_2} \right)}{\partial x_2} + W \tag{3.2}$$

A fenti egyenlet a következő feltételek kielégítésével alkalmazható:
- az áramlás freatikus akvifer közegben történik,
- az áramlás síkbelinek tekinthető,
- a vízhordó közeg homogén és izotróp,
- a talajvíz homogén, izotróp és összenyomhatatlan folyadék,
- jelentős vízszintváltozás lehetséges a szivárgás és a párolgás következtében.

Amennyiben a talaj izotróp, egyforma szivárgási tényezője van minden irányban ($K_1 = K_2 = const$), a (3.2) egyenlet egyszerűsíthető K-val:

$$\frac{e_p}{K} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial \left(H \cdot \frac{\partial H}{\partial x_1} \right)}{\partial x_1} + \frac{\partial \left(H \cdot \frac{\partial H}{\partial x_2} \right)}{\partial x_2} + \frac{W}{K} \tag{3.3}$$

Továbbá, állandósult áramláskor nincs időbeli változás, ennélfogva a (3.3) egyenlet bal oldala egyenlő nullával:

$$0 = \frac{\partial \left(H \cdot \frac{\partial H}{\partial x_1} \right)}{\partial x_1} + \frac{\partial \left(H \cdot \frac{\partial H}{\partial x_2} \right)}{\partial x_2} + \frac{W}{K} \tag{3.4}$$

Az állandósult áramlás diszkretizált egyenlete

Az állandósult áramlás véges növekmények módszerével felírva a következő alakot kapja:

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{H_{i+1,j} \cdot \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{\Delta x_1} - H_{i,j} \cdot \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{\Delta x_1}}{\Delta x_1} \\ & + \frac{H_{i,j+1} \cdot \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{\Delta x_2} - H_{i,j} \cdot \frac{H_{i,j} - H_{i,j-1}}{\Delta x_2}}{\Delta x_2} + \frac{W}{K} \end{aligned} \tag{3.5}$$

Négyzethálós felosztás esetén $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x$, a (3.5) egyenlet beszorozható a Δx^2 taggal:

$$\begin{aligned} 0 = & H_{i+1,j} \cdot (H_{i+1,j} - H_{i,j}) - H_{i,j} \cdot (H_{i,j} - H_{i-1,j}) \\ & + H_{i,j+1} \cdot (H_{i,j+1} - H_{i,j}) - H_{i,j} \cdot (H_{i,j} - H_{i,j-1}) + \frac{W \cdot \Delta x^2}{K} \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned} 0 = & H_{i+1,j}^2 - H_{i,j} \cdot H_{i+1,j} + H_{i-1,j} \cdot H_{i,j} - H_{i,j}^2 \\ & + H_{i,j+1}^2 - H_{i,j} \cdot H_{i,j+1} - H_{i,j}^2 + H_{i,j} \cdot H_{i,j-1} + \frac{W \cdot \Delta x^2}{K} \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$0 = H_{i+1,j}^2 + H_{i,j+1}^2 - 2H_{i,j}^2 + H_{i,j} \cdot (H_{i-1,j} + H_{i,j-1} - H_{i+1,j} - H_{i,j+1}) + \frac{W \cdot \Delta x^2}{K} \tag{3.8}$$

A (3.8) egyenlet alapján felírható az állandósult áramlás modellben alkalmazott implicit alakja:

$$\boxed{H_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{W \Delta x^2}{K} + H_{i+1,j}^2 + H_{i,j+1}^2 + H_{i,j}(H_{i-1,j} + H_{i,j-1} - H_{i+1,j} - H_{i,j+1}) \right)}} \tag{3.9}$$

A talaj hidraulikai porozitására a szakirodalom alapján $e_p = 30$ %-ot vettünk.

Az időben változó áramlás diszkretizált egyenlete

Az időben változó talajvízáramlást leíró Bussinesq egyenlet véges növekmények módszerével diszkretizálva a következő alakban írható fel:

$$\frac{e_p}{K} \cdot \frac{\partial H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{H_{i+1,j}^n \cdot \frac{H_{i+1,j}^n - H_{i,j}^n}{\Delta x_1} - H_{i,j}^n \cdot \frac{H_{i,j}^n - H_{i-1,j}^n}{\Delta x_1}}{\Delta x_1} + \frac{H_{i,j+1}^n \cdot \frac{H_{i,j+1}^n - H_{i,j}^n}{\Delta x_2} - H_{i,j}^n \cdot \frac{H_{i,j}^n - H_{i,j-1}^n}{\Delta x_2}}{\Delta x_2} + \frac{W}{K} \tag{3.10}$$

Négyzethálós felosztás esetén $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x$, a (3.10) egyenlet az alábbi alakot ölti:

$$\frac{e_p \cdot \Delta x}{K} \cdot \frac{\partial H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j}^n}{\Delta t} = (H_{i+1,j}^n)^2 + (H_{i,j+1}^n)^2 - 2(H_{i,j}^n)^2 + H_{i,j}^n \cdot (H_{i-1,j}^n + H_{i,j-1}^n - H_{i+1,j}^n - H_{i,j+1}^n) + \frac{W \cdot \Delta x^2}{K} \tag{3.11}$$

A (3.11) egyenletből kifejezhető az időben változó áramlás modellben alkalmazott explicit alakja:

$$\boxed{H_{i,j}^{n+1} = \frac{K \cdot \Delta t}{e_p \cdot \Delta x^2} \cdot \left(\frac{W \cdot \Delta x^2}{K} + (H_{i+1,j}^n)^2 + (H_{i,j+1}^n)^2 - 2(H_{i,j}^n)^2 + H_{i,j}^n \cdot (H_{i-1,j}^n + H_{i,j-1}^n - H_{i+1,j}^n - H_{i,j+1}^n) \right) + H_{i,j}^n} \tag{3.12}$$

A vízhozam és a térfogatváltozás számítása

A tóba be és ki is áramolhat a víz. A numerikus modellel szimulálható a tó talajvízáramlás útján, valamint a csapadék és a kipárolgás útján végbemenő vízcseréje. A talajvíz áramlásának sebessége a Darcy törvénnyel számítható (lásd a 4.38-as egyenletet, [2]), homogén izotróp környezet esetében a következő képlettel:

$$v = K \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial x} \tag{3.13}$$

Szabad felszínű talajvíz áramlása esetén $\partial \Pi = \partial H$, miáltal a (3.13) egyenlet a következő alakot ölti:

$$v = K \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \tag{3.14}$$

Egy adott kontroll térfogat valamely oldalán keresztül megvalósuló vízhozam az alábbi képlettel számítható ki:

$$q_i = K \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \cdot A_i \tag{3.15}$$

$$q_i = K \cdot \frac{H_t - H_v}{\Delta x} \cdot \frac{H_t + H_v}{2} \cdot \Delta x \tag{3.16}$$

A numerikus modellben használt egyenlet:

$$\boxed{q_i = K \cdot (H_t - H_v) \cdot \frac{H_t + H_v}{2}} \tag{3.17}$$

A (3.17) egyenlet értéke pozitív a tó töltődése esetén, illetve negatív amikor a tó ürül. A párolgás és a csapadék tóra gyakorolt hatása az alábbi képlettel számítható:

$$\boxed{Q_w = A_v \cdot W} \tag{3.18}$$

A tó északi részének névleges felülete $A_{ve} = 284400\ m^2$, a tó déli szektorának felülete $A_{vd} = 274900\ m^2$, összefülete $A_v = 559300\ m^2$. A tó tetszőleges időpontra vonatkozó vízmérleg egyenlete:

$$\boxed{\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_w + \sum_{i=1}^{k} q_{i+} + \sum_{i=1}^{k} q_{i-}} \tag{3.19}$$

Amennyiben a $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ hányados pozitív, a tó táplálódik és fordítva.

3.2.2. Kezdeti feltételek

Mivel a modellezett eset időben változó, a számításhoz szükség van mind a kezdeti, mind a peremfeltételek ismeretére. A szimuláció kezdetekor a számítási háló összes pontjában érvényes talajvízszintek képezik a kezdeti feltételt. Az első időpontban a kezdeti feltételt az állandósult áramlás modelljével számítjuk ki, az állandósult áramlás diszkretizált egyenletét (3.9) alkalmazva. A kezdeti feltételek meghatározásához ugyancsak szükség volt a határfeltételek megadására. Ezt ugyan úgy határoztuk meg, ahogy az összes többi időpontban, lásd a következő fejezetben. Ezt követően az állandósult áramlás egyenletével meghatározott kezdeti állapot segítségével számíthatjuk tovább az időben változó állapotokat. Az összes többi időpontban, az előző időpontban kapott talajvízszintek lesznek a kezdeti feltételek, amelyet az időben változó áramlás diszkretizált egyenletével (3.12) számolunk.

3.2.3. Peremfeltételek

Az elemzett probléma jellegéből adódóan a határfeltételek időben változó adatok. A talajvíz mozgás áramlási terét a tó zárt pereme, valamint a tótól távolabb húzódó zárt görbe vonal határolja, mely magába foglalja a 3 megfigyelt kutat is.

A tavat körülölelő külső zárt határvonal három olyan kúton halad keresztül (K1, K2, K3 (18. ábra)), amelyekben talajvízszint megfigyelés történt. A külső határvonal elfogadását az alábbi mérlegelés előzte meg: A terület felmérésekor az tapasztaltuk, hogy a 14-es és 1-es kutak környékén levő (5. ábra), a tótól északra és nyugatra fekvő ásott kutak kiszáradtak. Három kút bizonyult alkalmasnak a folyamatos talajvízszint mérésre.

A talajvízszint mérés viszonyító (referencia) síkjának a vízhordó réteg alsó zárósíkját fogadtuk el, amely a hidrogeológiai térképek valamint rendelkezésünkre bocsátott mélyfurat alapján kb. 30 méterrel a talajszint alatt, 90 m tengerszint feletti magasságon húzódik. A referencia síkhoz viszonyított talajvíz szintet H-val jelöltük. A rendelkezésre álló adatok alapján a vízhordó réteget homogén, izotróp közegként modelleztük. A külső görbevonalú határgörbe hosszán érvényes vízszint értékeket a rajta levő három kútban mért értékek lineáris interpolációjával határoztuk meg (17. ábra). Az ábrán sárga mezőkből illeszkedik össze a modell külső határvonala, a rajta levő három barna mező a kutak helyét jelöli. A tó kék színnel van jelölve, kerülete megegyezik a belső határvonallal amely mentén a kerületi feltétel maga a tó szintje. Piros színnel vannak jelölve az átereszek.

17. ábra: *Külső és belső határvonal*

A tó két szektorra van felosztva. Három áteresz található a tavon. Az északi átereszen keresztül táplálódik a tó, a középső áteresz összeköti a két szektort, az alsó átereszen keresztül pedig ürül a tó. Az átereszek zárva vannak, emellett el is vannak tömődve. A vízszint annyira alacsony, hogy a legnagyobb vízálláskor is csak $10 - 20$ cm magas a víz az átereszekben. A folytonosan alacsony vízszint és a sűrű nádborítás miatt csak két pontban sikerült tószintet mérni, amelyek nem mutattak jelentős eltérést a két szektor között. Így a modell működtetése során jogosan feltételeztük, hogy a teljes tó vízszintje megegyező. Vízszintmérés a középső áteresznél (18. ábra) az északi részben (T2), illetve a déli szektorban az áteresztől körülbelül 50 m-re levő használaton kívüli szivattyútelepen a (T1) pontban történt.

Mivel 2017.09.09. és 2018.01.13-a között az északi szektorban rendkívül alacsony volt a vízállás, a mérőhely szárazon maradt, ezért 11 alkalommal hiányzik az északi szektor vízszintje. Az adatokból látható (1. táblázat, 19. ábra), hogy a tószint a két szektorban majdnem megegyezik. Ez lehetővé tette, hogy a hiányzó 11 adatot lineáris interpolációs módszerrel pótoljuk. A T2+ a mért adatokat, a T2- pedig az interpolációval meghatározott tószinteket jelöli. Összesen 27 alkalommal történt vízszint mérés.

Mivel a modell instabil volt a két hetes időlépéssel, 1 naposra kellett azt csökkenteni. Mivel az adatok két hetente lettek rögzítve, a köztes időpontokra a peremfeltételeket lineáris interpolációs módszerrel határoztuk meg.

18. ábra: *A megfigyelt kutak*

19. ábra: *Az év folyamán mért talajvízszintek és tószintek*

n	1	2	3	4	5
Idopont	2017.07.29.	2017.08.12.	2017.08.26.	2017.09.09.	2017.09.23.
K2	121,191	121,121	121,066	121,011	121,026
K1	121,526	121,431	121,356	121,301	121,341
K3	119,781	119,696	119,606	119,526	119,461
T2+	120,914	120,809	120,769	?	?
T2-	-	-	-	120,690	120,690
T1	120,927	120,847	120,782	120,717	120,717

6	7	8	9	10	11
2017.10.07.	2017.10.21.	2017.11.04.	2017.11.18.	2017.12.02.	2017.12.16.
121,031	121,016	121,151	121,151	121,201	121,311
121,466	121,506	121,596	121,671	121,721	121,791
119,461	119,375	119,370	119,330	119,305	119,325
?	?	?	?	?	?
120,640	120,600	120,630	120,630	120,650	120,690
120,667	120,632	120,667	120,667	120,692	120,747

12	13	14	15	16	17
2017.12.30.	2018.01.13.	2018.01.27.	2018.02.10.	2018.02.24.	2018.03.10.
121,416	121,441	121,556	121,656	121,911	122,206
121,976	122,116	122,221	122,376	122,596	122,976
119,350	119,360	119,425	119,520	119,681	120,016
?	?	?	120,779	120,834	120,939
120,700	120,710	120,745	-	-	-
120,747	120,762	120,807	120,847	120,922	120,992

18	19	20	21	22	23
2018.03.24.	2018.04.07.	2018.04.21.	2018.05.05.	2018.05.19.	2018.06.02.
122,206	122,051	121,841	121,671	121,566	121,536
123,346	123,266	123,091	122,826	122,626	122,486
120,481	120,646	120,761	120,736	120,636	120,581
121,219	121,149	121,184	121,169	121,159	121,189
-	-	-	-	-	-
121,067	121,112	121,127	121,112	121,102	121,107

24	25	26	27
2018.06.16.	2018.06.30.	2018.07.14.	2018.07.28.
121,821	121,836	121,721	121,846
122,581	122,581	122,681	122,461
120,656	120,656	120,711	120,626
121,269	121,269	121,329	121,339
-	-	-	-
121,162	121,162	121,167	121,182

1. táblázat: *Az év folyamán mért talajvízszintek és tószintek (mtm)*

A Szabadkai Építőmérnöki Kar meteorológiai állomásának adatai 2018.04.23-ától állnak rendelkezésre. Mivel a hőmérséklet folyamatosan lett mérve, először meg kellett állapítani a havi átlaghőmérsékleteket, majd a Thorntwaite módszer alapján megállapítottuk a kipárolgást. A korábbi időszakra vonatkozó adatok a "Sumeteo" weboldalon elérhető Szabadkára vonatkozó adatok [5]. A táblázatokban két vonal határolja az Építőmérnöki karról származó adatokat, illetve a "Sumeteo" weboldalról származó adatokat.

Thorntwaite módszer az evapotranspiráció meghatározására

Gyakran használt módszer az evapotranszpiráció meghatározására a Thornthwaite módszer, mert csak a havi átlaghőmérséklet szükséges hozzá. Ez a módszer csak a talajból történő kipárolgás számítására vonatkozik. A módszer 4 lépésből áll, első lépésként meghatározzuk a havi hőmérséklet tényezőt. Ha az átlaghőmérséklet negatív, akkor az értéke nulla ($i = 0$):

$$i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,51} \tag{3.20}$$

Következő léspésként az előző egyenlet (3.20) segítségével meghatározzuk az éves hőmérséklet tényezőt:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \tag{3.21}$$

Harmadik lépésként meghatározzuk a potenciális evapotranszpirációt:

$$ET' = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_a}{I}\right)^{\alpha} \tag{3.22}$$

α értékét a következő módon számítjuk ki:

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,492 \tag{3.23}$$

Utolsó lépésként figyelembe vesszük a napos órák számát, beszorozzuk a korrekciós tényezővel, és megkapjuk az evapotranszpirációt:

$$ET = ET' \cdot \left(\frac{d}{12}\right) \cdot \left(\frac{N}{30}\right) \cdot k_r \tag{3.24}$$

Az előző képletben (3.24) d a napi napsütéses idő órában kifejezve, mely az évszaktól és a földrajzi elhelyezkedéstől függ. N az adott hónapban levő napok száma, k_r a korrekciós tényező. Az alábbi táblázatban (2. táblázat) látható az átlaghőmérséklet, a napsütéses órák száma, a korrekciós tényező és az evapotranszpiráció az egyes hónapokban.

A fenti táblázat (2. táblázat) segítségével meghatározható a kéthetes időszakokra vonatkozó kipárolgás. Ahol a két hetes időszak két hónapra esett, abban az esetben a napok számával arányosan számoltuk ki a kipárolgást. A csapadékból kivonva a kipárolgást, megkapjuk w értékét, amely a talajvíz táplálódását illetve fogyását határozza meg a csapadék meg a kipárolgás hatására. Az alábbi táblázatban (3. táblázat) láthatjuk a csapadék, az evapotranszpiráció és w értékét.

Hónap	T_a [°C]	d [h]	k_r	ET [mm]
2017.08.	23,3	14,10	0,8	110,12
09.	16,4	12,53	0,7	51,60
10.	11,4	10,92	0,7	28,46
11.	6,3	9,47	0,6	9,20
12.	2,6	7,70	0,6	2,34
2018.01.	3,4	9,10	0,6	3,98
02.	0,5	10,35	0,6	0,31
03.	2,8	11,92	0,7	4,68
04.	16,2	13,55	0,7	54,89
05.	19,6	14,97	0,8	92,59
06.	21,5	15,68	0,8	106,33
07.	21,8	15,33	0,8	109,45

2. táblázat: *Átlaghőmérséklet és kipárolgás Szabadka környékén*

Időtartam	P [mm]	ET [mm]	W [mm/s]
2017.07.29. - 2017.08.12.	21,3	51,39	$-2{,}49 \cdot 10^{-8}$
2017.08.12. - 2017.08.26.	13,1	51,39	$-3{,}17 \cdot 10^{-8}$
2017.08.26. - 2017.09.09.	13,4	35,78	$-1{,}85 \cdot 10^{-8}$
2017.09.09. - 2017.09.23.	57,2	24,08	$2{,}74 \cdot 10^{-8}$
2017.09.23. - 2017.10.07.	4,9	19,45	$-1{,}20 \cdot 10^{-8}$
2017.10.07. - 2017.10.21.	0,4	13,28	$-1{,}06 \cdot 10^{-8}$
2017.10.21. - 2017.11.04.	44,8	11,35	$2{,}77 \cdot 10^{-8}$
2017.11.04. - 2017.11.18.	14,9	4,29	$0{,}88 \cdot 10^{-8}$
2017.11.18. - 2017.12.02.	30,8	4,06	$2{,}21 \cdot 10^{-8}$
2017.12.02. - 2017.12.16.	51,6	1,09	$4{,}18 \cdot 10^{-8}$
2017.12.16. - 2017.12.30.	6,5	1,09	$0{,}45 \cdot 10^{-8}$
2017.12.30. - 2018.01.13.	13,6	1,75	$0{,}98 \cdot 10^{-8}$
2018.01.13. - 2018.01.27.	35,3	1,86	$2{,}77 \cdot 10^{-8}$
2018.01.27. - 2018.02.10.	35,1	0,76	$2{,}84 \cdot 10^{-8}$
2018.02.10. - 2018.02.24.	64,2	0,14	$5{,}30 \cdot 10^{-8}$
2018.02.24. - 2018.03.10.	47,6	1,45	$3{,}82 \cdot 10^{-8}$
2018.03.10. - 2018.03.24.	41,7	2,18	$3{,}27 \cdot 10^{-8}$
2018.03.24. - 2018.04.07.	5,3	12,22	$-0{,}57 \cdot 10^{-8}$
2018.04.07. - 2018.04.21.	7,1	25,61	$-1{,}53 \cdot 10^{-8}$
2018.04.21. - 2018.05.05.	2,0	30,64	$-2{,}37 \cdot 10^{-8}$
2018.05.05. - 2018.05.19.	22,2	43,21	$-1{,}74 \cdot 10^{-8}$
2018.05.19. - 2018.06.02.	20,4	43,67	$-1{,}92 \cdot 10^{-8}$
2018.06.02. - 2018.06.16.	126,3	49,62	$6{,}34 \cdot 10^{-8}$
2018.06.16. - 2018.06.30.	62,6	49,62	$1{,}07 \cdot 10^{-8}$
2018.06.30. - 2018.07.14.	24,7	50,97	$-2{,}17 \cdot 10^{-8}$
2018.07.14. - 2018.07.28.	52,9	51,08	$0{,}15 \cdot 10^{-8}$

3. táblázat: *Csapadék és kipárolgás a Kelebiai tó környékén*

3.2.4. Az elemzett időtartam

Az elemzett időtartam 1 év. A mérések 2017.07.29-én kezdődtek és 2018.07.28-ig tartottak, 2 hetente történtek. Ez a legrövidebb időtartam (1 év), amely betekintést adhat a szezonális változásokba. Természetesen az adatok visszatükrözik az adott év jellemzőit (csapadék, hőmérséklet, ...). A tó valódi állapotfelméréséhez viszont szükség lenne hosszabb időtartamra, hogy minden lehetséges forgatókönyv dokumentálva legyen. Az évre jellemző időjárás következtében történt változások jól megfigyelhetők a mért vízszinteken; a talajvíz majdnem 1 m-rel magasabb a mérés végén mint a mérés elején. Ez a különbség a 2018 tavaszán jelentkező sok csapadéknak köszönhető.

3.2.5. Az eredmények bemutatása és elemzése

A következő grafikonokon (21. ábra, 22. ábra, 23. ábra, 24. ábra, 25. ábra, 26. ábra, 27. ábra, 28. ábra, 29. ábra, 30. ábra) a numerikus modellel kiszámított talajvízszintek láthatóak. A színek magasságának értékei az alábbi ábrán látható (20. ábra).

Az ábrákon megfigyelhető, hogy a tó északkeleti irányból töltődik, délnyugat felé pedig folyik ki a víz. A hidrogeológiai térképeken adott áramlási irányt (északnyugat-délkelet), valamint a 3 kút helyzetét figyelembe véve megállapítható, hogy az északi szektor körül a modell jelentősen eltér a valós állapottól. Feltételezhetően a talajvíz magasabb a tó északi oldalán, vagyis az északi tóba több víz áramlik be, mint amennyit a modell mutat. Az áramlási irány eltérését a hidrogeológiai térképen mutatott iránytól nem indokolja a terület topográfiája.

20. ábra: *A 21.-től 30. ábrára vonatkozó szintjelölés (a számok méterben kifejezett tengerszint feletti magasságok)*

21. ábra: *Talajvízszintek 2017.07.29-én*

22. ábra: *Talajvízszintek 2017.09.09-én*

23. ábra: *Talajvízszintek 2017.10.21-én*

24. ábra: *Talajvízszintek 2017.12.02-án*

25. ábra: *Talajvízszintek 2018.01.13-án*

26. ábra: *Talajvízszintek 2018.02.24-én*

27. ábra: *Talajvízszintek 2018.04.07-én*

28. ábra: *Talajvízszintek 2018.05.19-én*

29. ábra: *Talajvízszintek 2018.06.30-án*

30. ábra: *Talajvízszintek 2018.07.28-án*

A numerikus modellel meghatároztuk a tóba be- és kiszivárgó víz mennyiségét. Mivel nem végeztünk a víz szabad vízfelszínről történő kipárolgásával kapcsolatban méréseket, a tóra is a Thorntwaite módszerrel számított kipárolgást használtuk. Ettől a valós kipárolgás valamivel nagyobb. Az említett okból tehát a W értéke ugyanaz a tó és a talaj esetében is. A W segítségével meghatároztuk a csapadék és a kipárolgás következtében jelentkező egységnyi idő alatt végbemenő tótérfoga tváltozást. Az adatok a 4. és 5. táblázatban vannak összefoglalva:

Időpont	n	Q_+	Q_-	Q_w	$\sum Q$
2017.07.29.	1	0,000	-0,001	0,000	-0,001
2017.08.12.	2	0,000	-0,001	0,007	-0,008
2017.08.26.	3	0,000	-0,003	0,009	-0,012
2017.09.09.	4	0,000	-0,002	0,005	-0,007
2017.09.23.	5	0,002	-0,000	0,008	0,009
2017.10.07.	6	0,001	-0,001	0,003	-0,004
2017.10.21.	7	0,000	-0,001	0,003	-0,003
2017.11.04.	8	0,002	-0,000	0,008	0,009
2017.11.18.	9	0,002	-0,000	0,003	0,004
2017.12.02.	10	0,002	-0,000	0,006	0,009
2017.12.16.	11	0,005	-0,000	0,012	0,016
2017.12.30.	12	0,003	-0,000	0,001	0,004
2018.01.13.	13	0,003	-0,000	0,003	0,005
2018.01.27.	14	0,004	-0,000	0,008	0,012
2018.02.10.	15	0,005	-0,000	0,008	0,013
2018.02.24.	16	0,007	-0,000	0,015	0,022
2018.03.10.	17	0,006	-0,000	0,011	0,016
2018.03.24.	18	0,001	-0,001	0,009	0,009
2018.04.07.	19	0,003	-0,000	0,002	0,001
2018.04.21.	20	0,001	-0,001	0,004	-0,005
2018.05.05.	21	0,000	-0,002	0,007	-0,008
2018.05.19.	22	0,000	-0,002	0,005	-0,007
2018.06.02.	23	0,000	-0,004	0,005	-0,009
2018.06.16.	24	0,003	-0,000	0,018	0,021
2018.06.30.	25	0,002	-0,000	0,003	0,005
2018.07.14.	26	0,000	-0,003	0,006	-0,009
2018.07.28.	27	0,000	-0,001	0,000	0,000

4. táblázat: *Északi szektor vízhozama (m^3/s)*

Q_+	Q_-	Q_w	$\sum Q$
0,000	-0,000	0,000	0,000
0,000	-0,001	-0,007	-0,007
0,000	-0,001	-0,009	-0,010
0,000	-0,001	-0,005	-0,006
0,001	-0,000	0,008	0,009
0,001	-0,000	-0,003	-0,003
0,000	-0,000	-0,003	-0,003
0,002	-0,000	0,008	0,010
0,001	-0,000	0,002	0,003
0,002	-0,000	0,006	0,008
0,003	-0,000	0,011	0,015
0,002	-0,000	0,001	0,003
0,002	-0,000	0,003	0,005
0,003	-0,000	0,008	0,010
0,003	-0,000	0,008	0,011
0,005	-0,000	0,015	0,019
0,005	-0,000	0,011	0,015
0,004	-0,000	0,009	0,013
0,002	-0,000	-0,002	0,001
0,001	-0,000	-0,004	-0,003
0,001	-0,000	-0,007	-0,006
0,001	-0,000	-0,005	-0,005
0,000	-0,001	-0,005	-0,006
0,004	-0,000	0,017	0,021
0,003	-0,000	0,003	0,006
0,001	-0,000	-0,006	-0,005
0,001	-0,000	0,000	0,002

5. táblázat: *Déli szektor vízhozama (m^3/s)*

31. ábra: *A tó vízmérlegének eredő vízhozama*

Az idő fügvényében a tóból 2017.07.29-től 2017.09.09-ig fogy a víz. 2017.10.21-én elkezd töltődni a tó egészen 2018.04.07-ig, majd ismét fogyni kezd. A sok esőnek köszönhetően 2018.06.02-án újból elkezdett töltődni a tó ami az elemzett időtartam végéig tartott (31. ábra).

Az elemzett időtartam alatt az északi szektor 116833 m^3-rel növekedett a mért adatok alapján, a számítás szerint pedig 101693 m^3-rel (32. ábra). Az eltérés 15140 m^3, ami 13 %-ot tesz ki. A déli szektor esetében 72522 m^3 volt a növekedés a mért adatok alapján, a számítás szerint pedig 117412 m^3 (33. ábra). Az eltérés 44890 m^3, ami 62 %. Ez az eltérés jelentkezhet a kipárolgás valamit a csapadék számításának módjából, de adódhat a valós és a modellben elfogadott szivárgási tényező különbségéből is. A felhasznált dokumentációból ugyanis nem derült ki, hogy a furatból vett talajmintákat milyen pontosságú módszerrel határozták meg.

A mért talajvízszintekből (19. ábra, 1. táblázat) megállapítható a tó és a talajvíz ingadozása az elemzett évben. A tó keleti oldalán a talajvíz $120 - 200$ cm-t ingadozott. A K1-es kútban $121,01$ m volt a legalacsonyabb vízszint, $122,21$ m volt a legmagasabb vízszint. A K2-es kútban $121,30$ m volt a legalacsonyabb vízszint, $123,35$ m volt a legmagasabb vízszint. A tó nyugati oldalán a K3-as kút környékén a talajvíz ingadozása 145 cm volt. A legalacsonyabb vízszint $119,31$ m, a legmagasabb $120,76$ m volt. A tó keleti partján egész évben magasabb volt a talajvízszint mint a tószint. A nyugati oldalán pedig egész évben alacsonyabb volt a talajvízszint mint a tószint. Ezenkívül megfigyelhető, hogy a keleti oldalon hamarabb jelentkeznek a változások, hamarabb kezd el emelkedni és csökkenni a talajvízszint. Ez azzal magyarázható, hogy a tó keleti oldalán homokrétegek húzódnak, míg a nyugati oldalon lösszös talajréteg dominál.

32. ábra: *Az északi szektor kumulatív víztérfogat változása az idő folyamán*

33. ábra: *A déli szektor kumulatív víztérfogat változása az idő folyamán*

A tó két részében hasonlóan alakult a vízszint, de 2018 tavaszán a sok eső következtében a megemelkedett vízszintek növekvő eltérést mutattak. Az északi szektor vízállás ingadozása 75 cm volt. A legalacsonyabb vízállás $120,60$ m, a legmagassabb pedig $121,40$ m. A déli szektor ingadozása 56 cm volt. A legalacsonyabb vízállás $120,63$ m, a legmagassabb pedig $121,20$ m. Megállapítható, hogy az északi szektorban alacsonyabb volt a vízállás mint a déli szektorban 2018.03.24-ig. Ez az eltérés nem tekinthető jelentősnek, mivel még a mérési hibahatáron belül van. Viszont a későbbiekben az északi szektorban magasabb volt a vízszint, az utolsó méréskor már 15 cm-rel meghaladta a déli szektor vízszintjét. Figyelemre méltó, hogy a tó vízszintje sokkal kisebb mértékben ingadozik mint a környező talajvízszintek.

Az 1969.04.11-én $122,5$ m volt a Kelebiai tó vízállása (6. ábra). A 2018 áprilisában mért legmagasabb tószint $121,18$ m, ez 130 cm-rel alacsonyabb mint az 1969-es állapot. A legmagasabb tószint $121,34$ m, ami 115 cm-rel alacsonyabb mint az 1969-es vízállás. A kutakban mért talajvízszintek is csak az egyik kútban, a nagy tavaszi essőzések után emelkedtek ez a magasság fölé. Nem tudni az akkori vízállás alacsony, magas vagy átlagos volt, viszont több mint 1 m-es különbség van a jelenlegi legmagasabb és az akkori állapot között.

Az említett eredmények a numerikus modellel számolt adatokat tükrözi. A mért tószint és a 3 pontban mért talajvíz szint alapján készült, az 1969-ben készített furat alapján meghatározott szivárgási tényezővel számolva. A vízhordó réteg homogén, izotróp közegként lett modellezve. Amennyiben pontosabb képet szeretnénk kialakítani a terület vízállásáról, több helyen kellene a talajvízszintet mérni. További, részletesebb talajvizsgálatra is szükség lenne, hogy számításba vehessük az esetleges talajbeli eltéréseket.

4. Záradék

A múltbéli adatokból kiderül, hogy 1988 előtt állandóan magas volt a Kelebiai tó vízállása, gyakran voltak árvizek. Több alkalommal végeztek lecsapolási munkálatokat. 1951. és 1985. között 3 kútban figyelték a talajvízszintet. Az 1969-ben mért adatokon kívül egyéb vízszintekre vonatkozó múltbéli adatot nem találtunk.

A terület felmérését követően megállapítottuk, hogy a tótól északra ki vannak száradva az ásott kutak. Csak 3 olyan kutat sikerült találni amelyek alkalmas volt vízszint megfigyelésére. A tóban két helyen történt vízszint mérés. Ezen adatok alapján készült a numerikus modell.

A mért adatok és a numerikus modell eredménye alapján megállapítható, hogy a tó északkelet felöl töltődik, délnyugat felé ürül. A tó északi szektorának vízszintingadozása az elmúlt évben 75 cm, a déli szektoré pedig 56 cm volt. A kutakban mért ingadozás ennél nagyobb volt, 120 cm-től 200 cm-ig terjedt a kutak helyzetétől függően. Az 1969-es adatokat összehasonlítva a mostaniakkal, több mint 1 m az eltérés a legmagasabb vízállás tekintetében.

Amennyiben pontosabb modellt szeretnénk felállítani szükség lenne egy átfogó talajvizsgálatra, illetve több megfigyelési pontra, kútra.

Felhasznált irodalom

[1] Hovany Lajoš: *Pregled promena u slivu Paličkog jezera od kraja XVII veka do danas i istraživanje uzroka tih promena - Doktorska disertacija*, Subotica, Gradjevinski Fakultet u Subotici, 2008.

[2] Đula Fabian, Ljubomir Budinski: *Potpovršinske vode*, FTN izdavaštvo, 2017.

[3] *Kelebijsko jezero:*
`https://hr.wikipedia.org/wiki/Kelebijsko_jezero`

[4] *U planu vraćanje Kelebijskog jezera:*
`http://www.gradsubotica.co.rs/u-planu-vracanje-kelebijskog-jezera/`

[5] *Sumeteo.info:*
`http://sumeteo.info/wxtempsummary.php`